



国防特色学术专著·动力机械及工程热物理

航空发动机气动声学

HANGKONG FADONGJI QIDONG SHENGXUE

乔渭阳 著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色学术专著·动力机械及工程热物理

航空发动机气动声学

乔渭阳 著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内 容 简 介

气动声学是气动力学和声学交叉产生的一门新兴的航空科学技术领域分支学科,航空发动机气动噪声则是气动声学的主要研究对象。本书从气动力学和气动声学的基本理论出发,研究当代先进航空燃气涡轮发动机气动噪声产生的物理机制,系统分析航空发动机气动噪声的基本特征;通过对国内外有关航空发动机气动声学研究工作的总结和分析,给出了航空发动机主要噪声源流动噪声的理论分析模型,介绍了航空发动机气动声学实验研究测量的新方法和新技术,并重点介绍了航空发动机气动噪声控制的原理和方法。

本书可供从事航空发动机、流体机械、飞行器设计和动力工程及工程热物理等专业的科研及工程设计人员参考,同时可作为相关专业的教师、研究生和大学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机气动声学/乔渭阳著. --北京:北京航空航天大学出版社, 2010.6
ISBN 978-7-81124-950-7

I. 航… II. 乔… III. 航空发动机—空气动力学:声学
IV. V231.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 203378 号

版权所有,侵权必究。

航空发动机气动声学

乔渭阳 著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:454 千字

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-81124-950-7 定价:54.00 元

前 言

飞机噪声问题是目前航空界普遍关心的问题之一。对于民用飞机,噪声辐射指标已经成为飞机适航审定的强制性指标,飞机噪声级的大小直接关系到适航签证的获取;对于军用飞机,噪声辐射则会影响到飞机的隐身以及结构声疲劳等。随着人类环境保护意识的不断增强和国际间航空市场竞争的日益激烈,特别是随着空中运输能力的不断提高、大型客机发动机推力和功率的不断增大、飞行速度的进一步加快等,飞机噪声问题变得更为突出。

飞机的主要噪声源是航空发动机气动噪声。航空发动机既是飞机的动力源,也是飞机巨大噪声的产生源。飞机噪声问题真正引起人们的关注也是20世纪50—60年代喷气式发动机开始投入使用的时候,第一代涡轮喷气发动机产生的巨大喷气噪声一方面引起了强烈的社会反响,另一方面也激发了研究人员对此问题的广泛关注。从这个时期开始,人们便以航空发动机内部气流(燃气)流动过程产生的噪声为主要研究对象,研究飞机/发动机噪声源的机理、气流和结构参数的影响、噪声级的理论预测方法以及降低噪声的方法等,并以研究开发基于气动声学设计方法来制造出低噪声发动机(也常称之为安静发动机 Quiet Engine)为主要目的,形成了航空宇航科学与技术领域一个独立的学科分支——气动声学。

如果以1952年英国首先发明成功的第一代喷气式民用飞机——彗星号(Comet)为标志,那么过去50多年的时间里,民用航空燃气涡轮喷气发动机技术的发展大致经历了三次更新换代,航空燃气涡轮发动机技术水平得到了很大提高。而噪声级大小作为航空发动机的主要技术指标之一,每一次技术上的更新换代,气动声学设计都起到了重要的作用。在2003年全球共同庆祝人类动力飞行100周年的时候,面对未来迅速发展的航空运输市场,特别是面对未来人类对环境保护的要求,国内外众多航空研究机构都将气动声学设计列为未来航空发动机发展的关键技术之一。

我国航空发动机的发展水平与先进国家相比仍然有很大的差距,特别是在民用航空发动机和飞机领域,与国外的技术差距非常明显。2005年我国启动的中长期科技发展战略,将“大型运输机”列入了国家重大技术专项,其中大型客机的发动机及其噪声问题将是我国大型客机研制发展中的重大技术基础问题之一。面对现实,展望未来,航空动力界的科研人员必须重视和关注航空发动机的气动噪声研究。

作者从20世纪90年代开始进行航空发动机气动声学研究,从理论、实验和数值预测等方面,对航空发动机气动声学问题开展了系统的研究。1995年,作者与其他学者合作编著了我国第一部飞机噪声入门书——《飞机噪声基础》。此后,

作者作为高级访问学者,曾经先后三次到国际著名的航空研究机构——德国宇航院(DLR)进行学术访问研究,在德国宇航院推进技术研究所柏林发动机声学分部工作期间,通过广泛的学术交流和深入系统的学术讨论,对航空发动机气动声学领域国际前沿及发展方向有了清晰的认识。

在德国柏林 Spree 河畔,作者就萌生了撰写《航空发动机气动声学》一书的念头,考虑到 1995 年出版的《飞机噪声基础》,距离航空发动机气动声学设计的目标还有相当大的距离,并考虑到迄今国内还鲜有专门综合论述航空发动机气动声学的专著,因而进一步促使作者提出了撰写该书的计划。近两年来,作者在参阅国外相关论文集的基础上,查阅、筛选了散见于国内外主要期刊、论文集上公开发表的研究成果,并予以归纳、整理,最终完成撰写《航空发动机气动声学》一书。

本书从气动力学和气动声学的基本理论出发,研究分析了当代先进航空燃气涡轮发动机气动噪声产生的物理机制,揭示了航空发动机气动噪声的基本特征,给出了航空发动机主要噪声源流动噪声的理论分析模型,介绍了航空发动机气动声学实验研究测量的新方法和新技术,分析了航空发动机气动噪声控制的原理和方法。本书内容基本上反映了高性能航空燃气涡轮发动机气动声学的基本理论架构和研究进展,对于先进航空发动机设计和研制具有重要的指导意义。

全书共分 9 章。第 1 章,引论,主要介绍了飞机和发动机噪声的工程背景和社会背景;第 2 章,声学基本概念和基本方程,从流体力学基本方程出发,介绍了声学基本方程和声学方程的求解,分析了声源基本理论和运动声源的特点;第 3 章,气动声学理论,这是本书的重点之一,从 Lighthill 气动声学基本方程的推导出发,介绍了不同形式气动声学方程的求解,并详细讨论了静止固体边界和运动固体边界对流体发声影响的基本方程和求解方法等;第 4 章,发动机喷流噪声,从 Lighthill 方程对喷流流场的应用开始,讨论了喷流噪声声功率计算、喷流噪声远场声压时间平均解、喷流噪声比例律关系、超声速喷流噪声特性、喷流噪声的预测方法等,最后研究了喷流噪声抑制方法;第 5 章,发动机管道声学理论分析,对管道内声波传播的基本理论和分析方法进行了讨论和分析;第 6 章,叶轮机噪声产生和传播的物理机制,这是本书的重点之一,从叶轮机流动噪声源和噪声传播的物理过程分析开始,分别介绍了叶轮机单音噪声、宽频噪声、叶轮机管道声模态等的产生、传播和辐射等;第 7 章,叶轮机噪声预测模型与控制方法,这也是本书的重点之一,分别介绍了叶轮机噪声的经验关联分析、叶轮机管道声学模型、基于线化非定常流理论的叶轮机噪声计算方法、基于 CFD 技术的叶轮机噪声计算方法等噪声分析模型,并介绍了叶轮机噪声控制方法;第 8 章,发动机燃烧与核心噪声,从燃烧噪声产生的机理入手,分别介绍了燃烧室几何和工作状态变化对噪声的影响、燃烧噪声特征和燃烧噪声源分析、燃烧噪声理论分析、燃烧噪声诊断技术、燃烧噪声控制方法等;第 9 章,航空发动机气动噪声实验测试技术,分别介绍

了航空发动机气动声学实验环境和测试方法、噪声源声功率测量技术、发动机管道声模态识别测量技术、基于传声器阵列的发动机噪声源识别测量技术等。

本书可供从事航空发动机、流体机械、飞行器设计和动力工程及工程热物理等专业的科研及工程设计人员参考,也可作为相关专业的教师、研究生和大学学生的参考书。书中各章后面都附有详尽的参考文献,可为有兴趣进一步研究的读者检索文献资料提供方便。

特别感谢作者的导师、德国宇航院 U. Michel 教授。在本书规划、内容编排等方面,U. Michel 教授给予了作者很多有益的建议,为作者提供了大量研究资料。

感谢德国宇航院 W. Neise 教授,他为作者提供了本书中有关发动机管道声学理论分析以及叶轮机噪声控制方法等方面的详细材料。燃烧噪声不是作者研究的重点,但为了本书内容上的完整,本书安排了《发动机燃烧与核心噪声》一章。这一章内容主要参考了由 Harvey H. Hubbard 教授主编的、以 NASA TR90-3052 报告形式发表的 *Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice* 一书中的相关内容,作者特此说明,并致感谢。

尽管作者力图按照全面反映高性能航空燃气涡轮发动机气动声学设计的技术特点、实用新颖的要求组织内容,但是限于水平,不妥甚至错误之处在所难免,诚挚欢迎读者批评指正。

作 者

2009 年 7 月于西安

目 录

第 1 章 引 论	1
1.1 飞机噪声问题	1
1.1.1 涡轮喷气发动机的出现开辟了人类航空运输的新纪元	1
1.1.2 喷气式民用航空运输带来了航空噪声的新问题	3
1.2 航空发动机噪声	6
1.3 飞机噪声评价参数	8
1.3.1 噪声的物理度量	8
1.3.2 频谱和频带	9
1.3.3 噪声的主观度量	10
参考文献	17
第 2 章 声学基本概念和基本方程	19
2.1 流体动力学基本方程	19
2.1.1 守恒律和本构方程	19
2.1.2 理想流体动力学基本方程表达形式	22
2.2 声学基本方程	24
2.2.1 流动过程物理量级分析	24
2.2.2 波动方程	27
2.3 声波方程的解	33
2.3.1 稳态介质中的简单波	33
2.3.2 运动介质中的波	35
2.4 声源分析	41
2.4.1 反问题和声源的唯一性问题	41
2.4.2 质量和动量入射	42
2.5 运动声源问题	42
2.5.1 方程的解	43
2.5.2 解的说明	44
2.5.3 压力场的说明	46
2.5.4 简单的谐波声源	47
2.5.5 多声源的分析	48
参考文献	49

第 3 章 气动声学理论	50
3.1 气动声学理论的产生及发展	50
3.2 Lighthill 声类比理论	52
3.2.1 Lighthill 方程推导	52
3.2.2 对流形式的 Lighthill 方程	54
3.2.3 基本气动噪声源	55
3.2.4 Lighthill 方程声源项分析	57
3.2.5 Howe 对流波动方程	58
3.3 Lighthill 方程的解	60
3.3.1 Kirchhoff 积分	60
3.3.2 Curle 对气动声学方程的积分解	61
3.3.3 对流 Lighthill 方程的解	62
3.3.4 远场近似	63
3.4 时间平均解	64
3.4.1 自相关函数	65
3.4.2 功率谱密度	67
3.5 静止固体边界对气动声源声辐射的影响	69
3.5.1 引 论	69
3.5.2 无限平板表面边界层噪声分析	70
3.5.3 具有边缘平板的气动噪声分析	74
3.6 运动固体边界对气动声源声辐射的影响——FW-H 方程	78
3.6.1 空间坐标系	78
3.6.2 运动坐标系	80
参考文献	81
第 4 章 发动机喷流噪声	85
4.1 引 论	85
4.2 喷流噪声声功率分析	87
4.2.1 Lighthill 方程对湍流流场的应用	87
4.2.2 运动速度对声强的影响	88
4.2.3 量纲分析	89
4.2.4 喷流结构及喷流噪声公式	90
4.3 喷流噪声远场声压时间平均解	91
4.3.1 功率谱密度	92
4.3.2 圆形射流的螺旋模态	92
4.3.3 喷流噪声的指向性	94

4.3.4 喷流气动声源的波动模型与旋涡模型·····	95
4.4 喷流噪声比例律关系·····	97
4.4.1 喷流流场比例律关系·····	97
4.4.2 喷流噪声声压比例律关系·····	99
4.5 超声速喷流噪声·····	101
4.5.1 马赫波辐射·····	101
4.5.2 宽频激波噪声·····	103
4.5.3 宽频激波噪声频率·····	104
4.5.4 宽频激波噪声频谱峰值宽度·····	106
4.5.5 宽频激波噪声的飞行效应·····	106
4.5.6 超声速喷流的尖叫声·····	107
4.6 喷流噪声的预测·····	108
4.6.1 静止状态喷流混合噪声预测·····	108
4.6.2 飞行状态喷流混合噪声预测·····	108
4.6.3 宽频激波噪声·····	108
4.6.4 空中飞行和风洞实验结果的关系·····	109
4.7 喷流噪声抑制·····	109
4.7.1 大涵道比涡扇发动机的使用·····	109
4.7.2 波瓣形喷管降噪·····	110
4.7.3 新型波纹形喷管降噪·····	111
4.7.4 气流屏蔽和几何偏置喷管·····	112
4.8 本章小结·····	113
参考文献·····	113
第5章 发动机管道声学理论分析·····	117
5.1 引 论·····	117
5.2 流动管道的波动方程·····	117
5.3 无流动矩形硬壁管道中的声传播·····	118
5.3.1 齐次波动方程的一般求解·····	118
5.3.2 刚体管道壁面边界条件·····	120
5.3.3 管道端口处的边界条件·····	122
5.3.4 声源处的边界条件·····	123
5.4 无流动圆柱或环形硬壁管道中的声传播·····	124
5.5 具有均匀流动的矩形管道内的声传播·····	127
5.6 本章小结·····	128
参考文献·····	129

第 6 章 叶轮机噪声产生和传播的物理机制	131
6.1 引 论	131
6.2 叶轮机流动噪声源和噪声传播的物理过程分析	132
6.2.1 叶轮机流动噪声的产生和传播过程	132
6.2.2 叶轮机流动噪声源	133
6.3 叶轮机定常和非定常气动力产生的单音噪声	134
6.3.1 转子叶片厚度噪声及定常叶片力噪声	134
6.3.2 非定常叶片气动力噪声	135
6.3.3 非定常叶片气动力旋转模态分析	137
6.3.4 超声速转子激波噪声	139
6.4 叶轮机随机非定常流动产生的宽频噪声	141
6.4.1 宽频随机噪声的理论分析	141
6.4.2 叶轮机不同随机噪声的分析比较	142
6.5 叶轮机管道声模态的产生	147
6.5.1 单转子产生的模态	147
6.5.2 非传播模态的衰减	148
6.5.3 转静干涉产生的模态	149
6.5.4 对转风扇转子干涉产生的模态分析	151
6.6 叶轮机管道声模态的传播和辐射	152
6.6.1 叶片排中声波的传播	152
6.6.2 管道中声波的传播及辐射	154
6.7 结束语	157
参考文献	158
第 7 章 叶轮机噪声预测模型与控制方法	162
7.1 引 论	162
7.1.1 航空发动机声学设计和降噪设计	162
7.1.2 叶轮机噪声分析模型概述	162
7.2 叶轮机噪声的经验关联分析	163
7.2.1 叶轮机噪声特征及经验关联关系	163
7.2.2 声源声功率计算	166
7.2.3 指向性函数	166
7.2.4 频谱函数	167
7.3 叶轮机管道声学模型	168
7.3.1 基本方程	168
7.3.2 风扇/压气机单音噪声计算	171

7.3.3	叶轮机单音噪声传播特性分析	173
7.3.4	叶轮机辐射声功率计算	173
7.4	基于线化非定常流理论的叶轮机噪声计算方法	174
7.4.1	概 述	174
7.4.2	准三维叶轮机噪声模型	175
7.4.3	准三维管道叶栅模型的实验考核	181
7.5	基于 CFD 技术的叶轮机噪声计算方法	183
7.5.1	概 述	183
7.5.2	压力模态匹配方法	184
7.5.3	声传播计算对网格的要求	185
7.5.4	计算实例	187
7.6	叶轮机噪声控制方法	189
7.6.1	选用合适的动静叶数目降低叶轮机噪声	189
7.6.2	增加转子、静子之间的距离	190
7.6.3	改变转静干涉的相位分布	191
7.6.4	叶片设计	195
7.6.5	叶轮机叶尖间隙噪声的减小方法	200
7.6.6	结 论	202
7.7	结束语	202
	参考文献	203

第 8 章 发动机燃烧与核心噪声

8.1	引 论	208
8.2	燃烧室几何和工作状态变化对噪声的影响	210
8.2.1	燃烧室几何变化对噪声的影响	210
8.2.2	燃烧室工作状态变化对噪声的影响	210
8.3	燃烧噪声特征和燃烧噪声源分析	212
8.3.1	燃烧噪声和核心噪声的特征	212
8.3.2	燃烧噪声源	214
8.4	燃烧噪声理论分析	216
8.4.1	燃烧噪声理论的发展情况	216
8.4.2	燃烧噪声理论及与实验的比较	217
8.4.3	燃烧噪声预测方法	219
8.5	燃烧噪声诊断技术	222
8.5.1	燃烧噪声测量技术	222
8.5.2	数据分析	225
8.5.3	应用实例	226

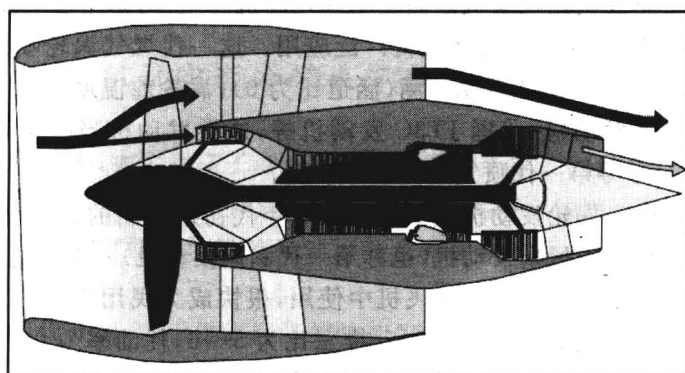
8.6 燃烧噪声控制	229
参考文献	229
第9章 航空发动机气动噪声实验测试技术	232
9.1 引 论	232
9.2 航空发动机气动声学实验环境和测试方法	233
9.2.1 自由声场与消声室	233
9.2.2 发动机声学实验的进气整流罩	236
9.2.3 测量传声器及安装方式	240
9.3 噪声源声功率测量技术	243
9.3.1 自由场测量方法	244
9.3.2 混响室测量方法	247
9.3.3 管道内测量方法	247
9.4 发动机管道声模态识别测量技术	249
9.4.1 管道声模态测量的目的	249
9.4.2 模态测量试验的必要性	249
9.4.3 周向模态测量的方法	250
9.5 基于传声器阵列的发动机噪声源识别测量技术	252
9.5.1 气动噪声源识别的重要性及发展	252
9.5.2 传声器阵列声源识别技术的基本原理	254
9.5.3 传声器阵列测量数据的处理	255
9.5.4 传声器阵列的“波束模式”	258
9.6 基于传声器阵列的发动机噪声源识别测量实例	260
9.6.1 基于线性传声器阵列的发动机噪声识别实验	260
9.6.2 发动机噪声源识别测量结果分析	262
参考文献	265

第1章 引 论

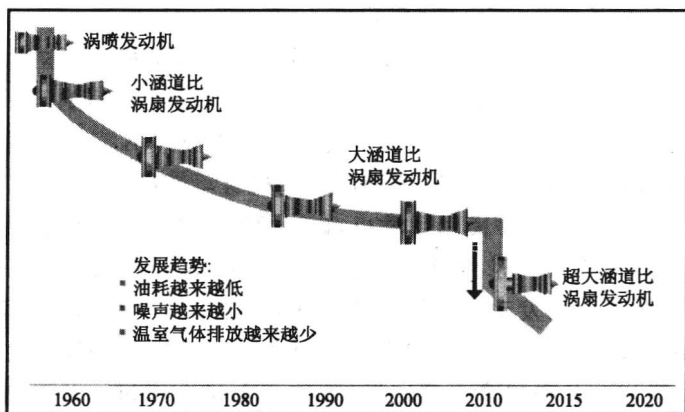
1.1 飞机噪声问题

1.1.1 涡轮喷气发动机的出现开辟了人类航空运输的新纪元

20世纪30年代末,由于战争的需要,航空燃气涡轮喷气发动机发明问世,并于20世纪40年代末首先应用于军用飞机。1952年,英国首先发展成功了第一代喷气式民用飞机——彗星号(Comet),从此,人类的航空运输业开始进入喷气时代。从第二次世界大战结束和涡轮喷气发动机(简称涡喷发动机)的出现到现在的50多年时间里,民用航空燃气涡轮喷气发动机技术大致经历了三代半的发展,每隔10年左右更新换代一次,航空燃气涡轮发动机技术水平得到了很大提高。图1-1给出了当代典型民用大涵道比涡轮风扇发动机(简称涡扇发动机)结构示意图,并形象地给出了过去50年来民用航空发动机的变化趋势。



(a) 当代典型民用大涵道比涡扇发动机结构



(b) 民用航空发动机发展趋势

图 1-1 当代典型民用大涵道比涡扇发动机结构及民用航空发动机发展趋势

表 1-1 所列为过去 60 多年来民用航空燃气涡轮发动机主要型号的性能指标及其装备的飞机型号情况。

表 1-1 典型民用航空燃气涡轮发动机

序号	发动机	主要特点	装备的典型飞机	装备时间
第一代	涡喷发动机: 埃汶、JT3C	涵道比:0 耗油率 0.1 kg/(N·h)	Boeing707、DC8 彗星号	20 世纪 50 年代
第二代	小涵道比涡扇发动机: JT3D、JT4	涵道比:1.5~2.5 耗油率 0.07~0.08 kg/(N·h)	Boeing707、727、737 DC 9、三叉戟	20 世纪 60 年代初
第三代	大涵道比涡扇发动机: JT9D-3、CF6、RB211	涵道比:5~6 耗油率:0.06~0.07 kg/(N·h)	Boeing747、DC10、 A300	20 世纪 70 年代初
	新一代大涵道比发动机: CFM56、V2500	涵道比:5~6 耗油率:0.05 kg/(N·h)	Boeing737、DC8、 A320、A340	20 世纪 80 年代
	超大涵道比涡扇发动机: GE90-115B、Trent800	涵道比:9~10 耗油率:0.05 kg/(N·h) 推力:535 639 N(54 620 kgf)	Boeing777	20 世纪 90 年代

第一代民用航空燃气涡轮发动机以涡轮喷气发动机为主,与军用航空发动机技术相当,于 20 世纪 40—50 年代研制,50—60 年代获得广泛应用。这一代燃气涡轮喷气发动机的推重比是 2~4,耗油率为 0.1 kg/(N·h),无外涵(涵道比为 0),涡轮前温度在 1 200~1 300 K。典型的发动机有英国埃汶发动机、美国 JT3C 发动机等,这类发动机当时主要装备的飞机包括 Boeing707、DC8、彗星号等第一代喷气式民用运输机。

第二代民用航空燃气涡轮发动机是 20 世纪 60 年代初期研制的,它是由军用涡轮喷气发动机衍生出的小涵道比涡轮风扇发动机(也称第一代涡扇发动机)。由于这类发动机具有较低的耗油率,因此,促使其迅速转换到商用飞机中使用,很快成为民用飞机的主要动力装置。这一代涡轮风扇发动机的涵道比为 1.5~2.5,推重比为 5~6,耗油率为 0.07~0.08 kg/(N·h),涡轮前温度为 1 400~1 500 K。典型的发动机有美国的 JT3D、JT4 等,主要装备 Boeing707、727、737、DC9,三叉戟等喷气式运输机。

第三代民用航空燃气涡轮发动机为大涵道比涡轮风扇发动机(也称第二代涡扇发动机)。与前两代发动机相比,这一代发动机技术上有很大的进步,涵道比达到 5~6,推重比为 5~7,耗油率为 0.06~0.07 kg/(N·h),涡轮前温度为 1 400~1 600 K。这一代民用涡轮风扇发动机是 20 世纪 70 年代初开始投入使用的,典型的发动机有早期的 JT9D-3、CF6、RB211 等,主要装备 Boeing747、DC10、A300 等民用运输机,以及 20 世纪 80 年代开始装备的新一代大涵道比涡扇发动机 CFM56、V2500 等,装备的飞机有 Boeing737、DC8、A320、A340 等。

第三代民用航空燃气涡轮发动机同第二代相比,性能有了大幅度的提高,技术先进,服役时间比一、二代发动机长得多,而且这一代发动机仍然处于不断改进发展之中。20 世纪 90 年代之后,这一代发动机进一步向更高涵道比发展,技术上又有了进一步的提高,涵道比达到了 9~10,推重比为 5~7,耗油率为 0.05 kg/(N·h)。典型的发动机有 GE90-115B、Trent800 等,装备的飞机有 Boeing777 等。

过去 60 多年的快速发展,使得民用航空燃气涡轮喷气发动机的技术水平得到了很大的提高,发动机推力不断增大,热效率不断提高,耗油率得到了大幅度的降低,发动机寿命得到大幅度的提高。目前,民用大涵道比涡扇发动机最大推力超过 50 000 daN(GE90),巡航耗油率从涡喷发动机的 $0.1 \text{ kg}/(\text{daN} \cdot \text{h})$ 下降到 $0.050 \text{ kg}/(\text{daN} \cdot \text{h})$ 。发动机可靠性和耐久性倍增,民用发动机空中停车率每 1 000 飞行小时降低到 $0.002 \sim 0.02$,发动机热端部件寿命达 $7\,000 \sim 10\,000 \text{ h}$ (10 年)。

目前民用航空燃气涡轮发动机的发展情况是,采用与军用飞机类似的发动机而形成的第一、二代民用发动机,现在已经退役。从第三代开始,民用发动机是专为宽体客机研制的高涵道比涡扇发动机,同军用发动机追求高推重比和高飞行速度相比,民用航空燃气涡轮发动机将技术追求的重点放在了降低噪声辐射、降低耗油率、减小排放污染等主要技术目标上,从此,西方民用航空发动机走上了一条与军用航空发动机不同的技术发展道路。目前航线上大部分民用飞机普遍采用该类发动机。

回顾喷气式民用运输机过去 50 年的发展,可以看出,航空燃气涡轮喷气发动机的出现和使用,使得人类航空运输事业取得了突飞猛进的发展,目前在全球范围内,有近 20 000 架各类喷气式民用飞机在繁忙地飞行中,从能乘坐几人的小型公务机(如奖状飞机)到能乘坐近 600 人的大型 A380 飞机等,人类真正进入到了喷气运输时代。民用航空运输和民用航空工业已经成为当代最大规模的科学技术和工业领域的全人类的活动,航空运输改变了整个人类的生活方式,促进了人类文明的发展。

1.1.2 喷气式民用航空运输带来了航空噪声的新问题

喷气式民用飞机的出现,大大提高了商业飞行的速度和效率。但是,由于早期的喷气发动机都是从军用飞机移植过来的,发动机高速喷流产生的强烈喷流噪声,引起了公众强烈的反应,很快引起了社会的关注,也使得敏锐的科学家注意到了研究民用航空领域噪声问题的重要性。

而从 20 世纪 60 年代开始,由于世界经济的快速发展,国际民用航空运输市场迅速发展,巨型喷气式民用飞机迅速发展并逐渐普及,其带来的巨大的噪声污染,使得飞机的噪声问题日趋严重,引起的社会反响越来越强烈。例如,1958 年首批远程喷气式飞机——Boeing707 问世,1962 年 DC8 远程飞机问世,使得 70 年代初期国际远程航线这两种商用飞机数量达到 1 500 架之多。飞机噪声问题日趋严重,特别是 Boeing707 飞机,在其服役早期曾引起严重的环境问题和政治争论。由美国 PW 公司生产的 JT3 和 JT4 发动机以及英国 RR 公司生产的 Conway 发动机辐射的噪声之大,迫使伦敦希思罗机场和纽约肯尼迪机场制定了严格的噪声限制,并在机场安装监测系统,以监督进港飞机是否遵守机场规定的限制,不能满足这些限制的远程飞机被迫轻载起飞,以便快速爬高和迅速远离居民区,然后在中间机场装满燃油继续完成远程飞行。

除了上述远程喷气式民用飞机巨大的噪声污染问题之外,20 世纪 60 年代中期美国又相继推出 DC9、Boeing727 和 737 等中短程喷气式民用飞机,欧洲推出了三叉戟、VC-10 等中短程喷气式民用飞机。到 60 年代末,喷气式飞机的数量达到了 2 000 架之多,并超过了螺旋桨飞机的数量,又进一步大大增加了飞机噪声污染问题。图 1-2 是喷气式飞机在机场周围产生

的噪声污染示意图。

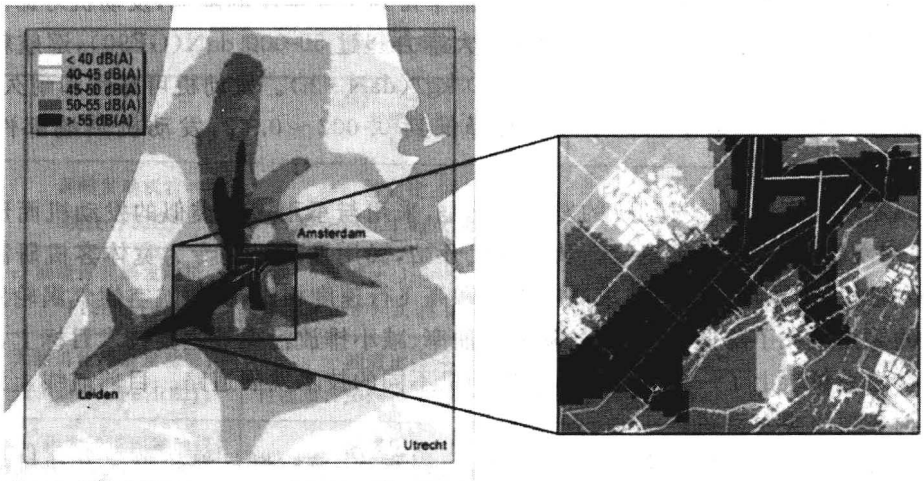


图 1-2 喷气式飞机在机场周围产生的噪声污染

另一方面,20 世纪 60 年代之后,人类对环境保护问题的日益重视,使得世界范围内的喷气式飞机噪声污染问题变得越来越突出,飞机噪声引发的抗议不断增多。针对以上工程背景和社会反响,国际航空界不得不开始重视和面对飞机噪声问题。1966 年伦敦国际会议首次签署了通过“审定”的方法对制造厂产品加以噪声控制的方案。1969 年,在国际民航组织 ICAO 的主持下,召开了有美、英、法等主要航空运输发达国家参加的国际飞机噪声会议,并专门成立了负责处理噪声问题的飞机噪声委员会 CAN,负责处理世界范围内逐步升级的飞机噪声问题。

1971 年美国国会通过了联邦航空规章的新章程——FAR Part36,从此,民机噪声作为飞机适航取证的强制性指标(图 1-3 是民用飞机适航噪声标准),必须得到遵守。也是从这个时期开始,各大飞机制造公司和航空研究机构,开始投入巨大的力量,研究飞机的噪声问题,对飞机各种噪声源噪声辐射特征进行了大量的理论和实验研究。随着“协和”飞机因噪声超过 FAR36 第三阶段的要求而被迫停飞,还有大型运输机如安 70、伊尔 76 等,因不能满足噪声适航条例而影响了其向国外市场的营运等诸多情况的发生,迫使许多著名航空公司和航空研究机构,如 Boeing、空客、NASA、ONERA、DLR 等,投入巨大的研究力量,为未来新一代民用飞机能满足更加严格的噪声要求而努力。目前,飞机噪声问题已成为航空工业技术中的重要内容,飞机噪声设计技术已经成为各国发展航空事业,尤其是发展大型客机的竞争筹码。

目前共同的观点是,至少在 21 世纪上半叶,燃气涡轮发动机仍将占据航空动力的主导地位,还看不到其他可以替代涡轮喷气发动机的动力装置。而进入 21 世纪以来,随着人类环境保护意识的不断增强,对飞机噪声强制性指标的要求越来越高,特别是随着全球经济一体化步伐的加快和各大国在政治、经济、军事等领域竞争的加剧,航空运输业进一步出现快速发展的趋势,空中运输在迅速膨胀,飞机在提高飞行速度和大型化发展方向上,与人类环保追求的低噪声要求形成了越来越突出的矛盾,使得飞机噪声问题成为目前航空界重要的前沿研究领域和技术难点之一。图 1-4 是 Boeing 公司预测未来航空运输对飞机数量需求的增长趋势,图 1-5 是全球范围内对噪声严格限制的机场数增加情况。

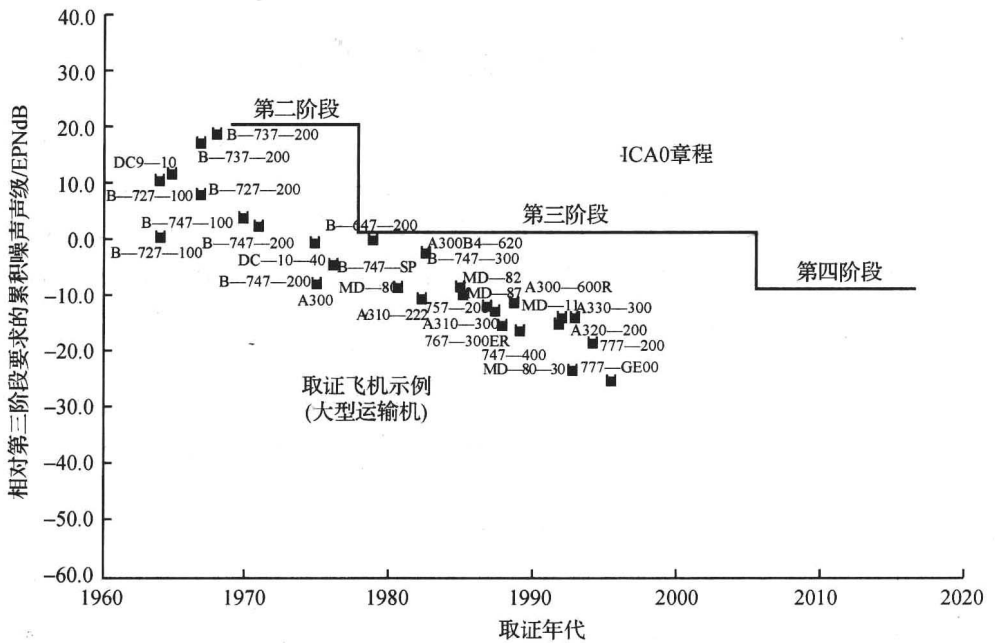


图 1-3 飞机适航噪声标准

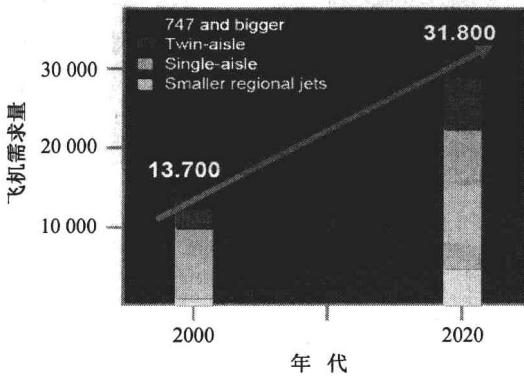


图 1-4 全球航空运输对飞机数量需求的增长趋势预测

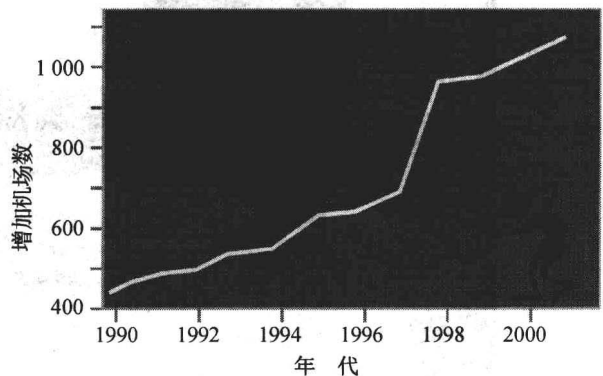


图 1-5 全球范围内对噪声严格限制的机场数增加情况

正是在上述工程背景和国际社会发展背景下,西方航空业发达国家,包括美国和欧盟等,在制定 21 世纪重大航空科技战略时,启动了一系列的航空发动机低噪声研究计划,这些研究计划的目标就是要使下一代民用航空发动机的耗油率、噪声污染和排气污染等进一步大幅度降低,以适应人类未来更加密集繁忙的航空运输。例如,NASA 在经过先进亚声速飞机 (AST) 噪声研究计划(1994—2001 年)实现民用飞机降噪目标 8 dB 之后,又启动了安静飞机技术(QAT)研究计划,要进一步降低飞机噪声 5 dB;未来的目标是使飞机的适航噪声指标有效感觉噪声级下降 20 dB。欧盟则在 FP4 和 FP5 规划的基础上启动 FP6 和 FP7 规划,以使民用飞机噪声进一步大幅度降低。